

## 레이더를 이용한 콘크리트의 두께 측정과 유효 측정범위 설정에 관한 연구

### A Study on the Determination of Concrete Thickness and Effective Measurement Area using Radar

임홍철\*, 이지훈\*\*, 손병오\*\*

Hong-Chul Rhim\*, Ji-Hoon Lee\*\* and Byung-Oh Son\*\*

**초 록** 콘크리트 구조물의 성능평가 방법의 하나로 최근 들어 레이더가 널리 쓰이고 있다. 콘크리트 구조물 적용에 대한 레이더법의 발전을 위해서는, 콘크리트의 전자기적 재료 특성과 레이더의 작동원리를 이해하고, 활용하는 체계적인 연구노력이 필요하다. 본 논문에서는 레이더법의 유효 측정범위 설정과 레이더를 이용한 콘크리트의 두께측정 방법을 제시하고, 레이더 측정을 통한 콘크리트의 유전상수 계산 방법을 제안한다. 실험에서는 900mm (길이) × 600mm (폭)에 두께 50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 250mm의 콘크리트 시편 5개를 사용하였다.

**주요용어:** 레이더, 콘크리트, 비파괴검사

**Abstract** Radar is becoming a popular tool for condition assessment of concrete structures. The advancement of radar method to concrete structures requires a systematic approach, which incorporates the fundamentals of radar theory and the characteristics of concrete as a material with electromagnetic properties. The research work presented in this paper deals with the establishment of effective measurement area for radar measurements, the determination of concrete thickness using radar, and the calculation of the dielectric constant of concrete from radar measurements. As results, formulas have been suggested to determine optimum measurement area for concrete, using radar and concrete thickness has been successfully identified for specimens used in this work. In the experiments, five concrete specimens which have the dimensions of 900mm (length) × 600mm (width) with thickness variation from 50mm to 250mm are used.

**Keywords:** radar, concrete, nondestructive testing (NDT)

#### 1. 서 론

콘크리트 구조물은 시간이 지남에 따라 그 내구성 저하되기 때문에, 콘크리트 구조물의 안전성 진단 문제가 특히, 노후화한 콘크리트 부재에서 중요한 과제로 부각되고 있다. 이러한 안전성 진단을 수행하는데 있어서, 최근

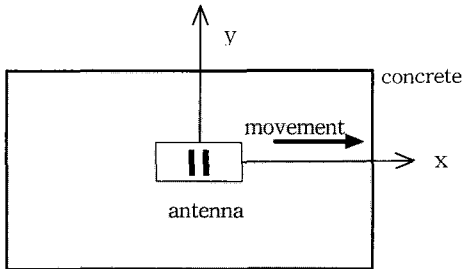
들어 각종 비파괴 검사방법이 유용하게 사용되고 있다[1]. 그 중 레이더는 콘크리트의 부재 두께 측정, 철근 및 내부 결함 탐색 등에 이용될 수 있어 활용 범위가 넓다. 레이더는 목표물에서 반사된 전자파를 수신하여 목표물에 대한 정보를 알 수 있다. 레이더법 사용 초기에는 지질조사, 지하매설물 탐사 등에 이용되었고, 최근 들어 도로,

터널, 교량상판, 철근 콘크리트 구조물 등 토목, 건축분야에서 그 연구와 실무 적용이 활발히 이루어지고 있다 [2,3].

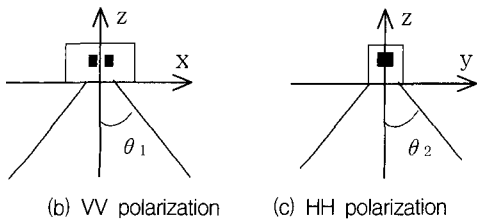
현재 상용되고 있는 비파괴 검사 방법으로서의 레이더법을 발전시키기 위해서는 보다 체계화된 접근이 필요하다. 특히, 콘크리트 구조물의 경우, 그 특성상, 콘크리트 배합의 불균질성, 수분의 함유, 보강철근의 간섭효과 등으로 실험결과와 해석이 용이하지 않는데[4], 이에 대한 레이더 검사법을 효율적으로 적용시키기 위해서는 i) 콘크리트의 기계적 성질 뿐만 아니라, 전자학적 재료 성질을 함께 측정, 파악하고[5], ii) 비파괴 검사 방법 중 하나인 레이더법에 연구의 중점을 두어 전자파의 전파현상을 이론적으로 모델링하며[6], iii) 콘크리트 시편과 시험구조체에 대한 실측을 실시[7], iv) 궁극적으로는 내부 상태를 파악할 수 있는 신호 처리 방법을 개발의 단계적 접근이 필요하다[8].

레이더는 안테나를 통해 전자파를 송신할 때, Fig. 1에서처럼, 일정한 각도를 갖고 파를 보낸다.

그리고, 송신파의 진행각도는 안테나에 따라, Fig. 1(b) 와 Fig. 1(c) 에서처럼, 전후와 좌우의 투사각이 다를 수 있다. 특히, Fig. 2 에서와 같이 안테나가 검사 대상물의 두께를 충분히 투과할 위치에서(Fig. 2 ①) 검사할 경우는 큰 문제가 없지만, 모서리와 간섭을 일으킬 경우(Fig. 2 ②), 측정 결과에 영향을 미칠 수 있다.



(a) Movement of antenna



(b) VV polarization (c) HH polarization

Fig. 1 Effective line of antenna

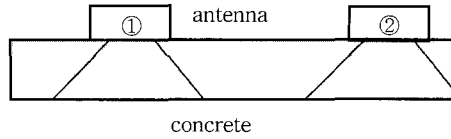


Fig. 2 Edge effect of radar system

따라서, 레이더법을 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴 검사 시, 검사에 앞서 정확한 측정을 위하여, 모서리의 간섭 영향을 피하기 위한, 유효 측정범위를 설정할 필요가 있다.

측정범위를 설정한 후, 레이더를 이용하여 실시 할 수 있는 1차적인 검사는 콘크리트의 두께 측정이다. 콘크리트 두께 측정은 단순하지만, 중요한 의미를 갖고 있다. 포장된 도로의 시공 두께, 사용년수 경과후의 잔여 두께 측정, 그리고 양면 접근이 불가능한 콘크리트 벽체, 기초, 터널 배면의 두께를 측정하는데 유용하게 사용될 수 있다. 두께를 측정하기 위해서는 레이더의 전자파가 콘크리트의 두께를 완전 투과하여 돌아와야 하는데, 일정 두께 이상이 되면, 에너지 손실로 두께를 측정할 수 없게 된다. 이 같은 한계는 콘크리트의 전자학적 성질과 레이더의 주파수 등에 의해 결정되므로, 복합적인 문제이다.

전자파의 콘크리트 내 투과시 그 속도는 콘크리트의 전자학적 특성인 유전상수에 의해 결정된다. 이는 유전상수를 파악하지 않고 레이더를 사용하면, 전혀 다른 결과를 얻을 수 있다는 것이다.

이 논문에서는 콘크리트 비파괴 검사에 레이더를 보다 체계적으로 사용하기 위하여, i) 콘크리트 시편 내 레이더의 유효 측정범위 설정, ii) 콘크리트 두께 측정을 위한 신호처리 및 판독, 그리고 iii) 유전상수 계산 방법에 관한 연구내용과 결과를 논의한다. 실험에는 1GHz 중심 주파수를 가진 안테나를 연결한 상용 레이더 시스템을 사용하였다.

## 2. 레이더 측정에 관련된 이론

레이더를 이용한 콘크리트 탐사는 Fig. 3 에서와 같이 콘크리트 표면에서 콘크리트 내부를 향해 안테나로부터 전자파를 방사한 후, 반사되어 돌아온 신호의 영상을 해석하여 이루어진다. 안테나로부터 송신된 전자파는 콘크리트의 경계면과 그 내부의 철근, 공동 등 여러 요인들의 상이한 전자학적 특성에 의해 그 경계면에서 반사가 일어나며, 이 반사파를 수신, 분석하여 콘크리트의 두께 및 콘크리트 내부의 상황을 파악할 수 있다[9].

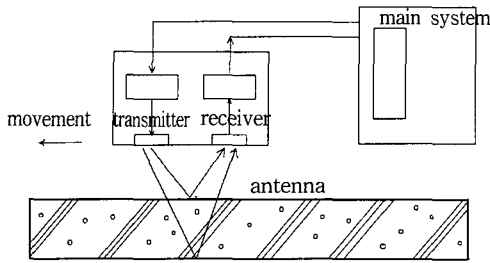


Fig. 3 Schematic view of a radar system

2.1. 콘크리트의 전자기적 특성

모든 물질은 전자기파의 전계와 자계에 영향을 주는 고유한 특성을 가지고 있다. 물질의 전자기적 특성은 일반적으로 복소유전율(complex permittivity), 복소투자율(complex permeability)로 나타낼 수 있다. 콘크리트는 유전체(dielectric, nonmetallic material)로서, 콘크리트를 포함한 대부분의 유전체는 비자성이다. 비자성 물체의 투자율은, 진공에서의 투자율( $4\pi \times 10^{-7}$  Henry/meter)과 거의 같기 때문에 유전율만을 고려하여, 전자기적 특성을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon^* = \epsilon - j\epsilon' \quad [\text{Farad/meter}] \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon^*$  : complex permittivity  
 $\epsilon$  : real part of complex permittivity  
 $\epsilon'$  : imaginary part of complex permittivity  
 $j$  :  $\sqrt{-1}$

위 식의 양변을 식 (2)와 같이 진공중의 유전율인  $\epsilon_0$ 로 나누면 식 (3)의 상대 유전율이 된다.

$$\frac{\epsilon^*}{\epsilon_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} \quad (2)$$

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r - j\epsilon_r' \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon_r^*$  : relative complex permittivity  
 $\epsilon_0$  : permittivity of free space  
 $8.854 \times 10^{-12}$  Farad/meter

$\epsilon_r$  : dielectric constant

$\epsilon_r'$  : loss factor

유전상수는 외부의 전기장으로부터 유전체가 에너지를 축적할 수 있는 정도를 나타내는 것이며, 대부분의 고체나 액체에서 1보다 큰 값을 보인다. 그리고 loss factor는 외부의 전기장에 대해 유전체의 에너지 손실정도를 나타내며, 일반적으로 유전상수에 비해 아주 작은 값을 가진다. 이 값들은 주파수, 수분, 온도, 혼합물의 종류에 따라 다른 값들을 가진다[5].

2.2. 반사계수

매질의 전자기적 특성에 근거하여 레이더로 측정된 결과를 분석할 수 있다. 파의 진행 시 매질이 변하게 될 때, 유전상수의 차이에 의해 경계면에서 일부는 반사되고, 일부는 투과된다. 이 반사파를 수신, 분석하는 것이 레이더법의 과정이다.

반사계수(reflection coefficient) 또한 유전상수에 의한 식으로 나타낼 수 있다. 하나의 매질 1에서 다른 매질 2로 투과될 때의 반사계수를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}'} - \sqrt{\epsilon_{r2}'}}{\sqrt{\epsilon_{r1}'} + \sqrt{\epsilon_{r2}'}} \quad (4)$$

여기서,  $R$  : reflective coefficient  
 $\epsilon_r$  : dielectric constant

위 식에서 보듯이, 반사계수는 유전상수의 조합으로 나타낼 수 있으므로, 유전상수 정보로써 계산할 수 있다. 예를 들어, 공기 중 유전상수  $\epsilon_{r1}' = 1$ , 콘크리트 유전상수  $\epsilon_{r2}' = 9$ 를 대입하면, 반사계수  $R = -0.5$ 이다. 반사계수가 음의 부호를 가진다는 것은 입사파의 위상과 반사파의 위상이 상반된다는 것을 나타낸다.

본 실험에서는 공기 중에서 콘크리트로 투과될 시 유전상수 차이에 의한, 파의 위상차로부터 시편의 앞면을 찾아내고, 뒷면에 철판을 댄 경우와 그렇지 않은 경우의 파형을 비교하여 시편의 뒷면을 찾아낸다. 즉, 뒷면에 철판이 있는 경우에는 철판에 의한 전반사가 일어나게 됨으로 철판을 대지 않을 경우와 비교하면 뒷면을 찾아낼 수 있다.

2.3. 파의 감쇠와 투과 깊이

콘크리트와 같이 전도성이 낮은 유전체에서의 감쇠계수(attenuation coefficient)는 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_r}} \tag{5}$$

여기서,  $\alpha$  : attenuation coefficient  
 $\sigma$  : conductivity  
 $\mu_0$  : permeability of free space  
 $\epsilon_r$  : dielectric constant

감쇠계수는 유전체내 파의 진행 시 에너지의 감소를 결정짓는 요소이다. 비파괴검사에서 감쇠계수는 그 역수가 투과 깊이를 나타내게되므로 중요성을 가진다.

투과깊이( $\delta$ )는 유전체 내에서의 에너지흡수로 인해 진행 평면파의 진폭이 초기 진폭에 비해  $e^{-1} = 0.368$  배로 감소하는 거리를 말하는 것으로, 식 (6)과 같이 감쇠상수 ( $\alpha$ )와 역의 관계를 가진다.

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu_0}} \tag{6}$$

여기서,  $\delta$  : penetration depth

위의 두 식에서 보듯이 감쇠상수와 투과 깊이는 물질의 전도율, 결과적으로는 주파수에 달려 있음을 알 수 있다. 위의 식에 근거하여 투과 깊이를 계산해본 결과 1GHz 주파수 대역에서는 약 250 ~ 300mm 정도까지 투과 가능한 것으로 나타났다.

2.4. 유전체내에서의 파의 전파속도

진공 중에서의 전자기파의 전파속도는 광속이지만, 콘크리트와 같은 유전체에서는 유전상수의 영향으로 식 (7)과 같이 표현된다. 아래 식에서 보듯이, 유전체 내에서 파의 전파 속도는 전자기적 성질을 나타내는 유전상수에 의해 결정이 되며, 이는 두께 측정에 있어 가장 중요한 요소라고 할 수 있다.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \tag{7}$$

여기서,  $v$  : velocity (m/s)  
 $c$  :  $3 \times 10^8$  meters/sec  
 $\epsilon_r$  : dielectric constant

3. 장비와 시편

3.1. 실험 장비

실험장비로는 상용 레이더 시스템에 1GHz의 중심주파수를 갖는 안테나를 연결해서 사용하였다. 사용된 시스템에서의 송신파 (incident wave) 특성을 요약해보면 다음과 같다

- Center Frequency : 1GHz
- Frequency Bandwidth : 1GHz (0.5~1.5GHz)
- Pulse Repetition Frequency : 50kHz
- Radiated Power : 0.52mW

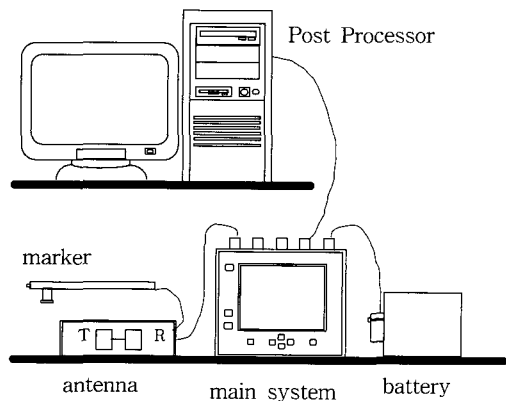


Fig. 4 Measurement system of radar

3.2. 시편

유효측정 범위 및 두께 측정을 위한 시편을 5개를 제작하였으며, 모서리 반사의 영향측정에도 이 시편을 사용하였다. 시편의 물, 시멘트와 모래의 비율은 1 : 2.22 : 5.61 이다. 시편의 치수는 다음의 Table 1과 같다.

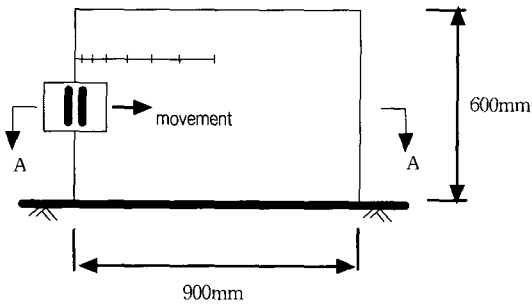
Table 1 Dimensions of specimens

No.	Length(mm)×Width(mm)×Thickness(mm)
1	900 × 600 × 50
2	900 × 600 × 100
3	900 × 600 × 150
4	900 × 600 × 200
5	900 × 600 × 250

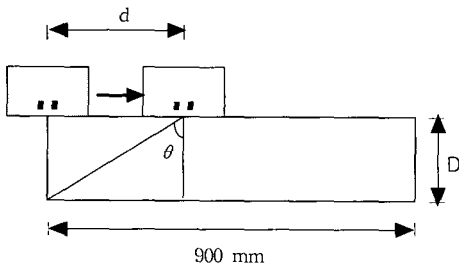
4. 실험

4.1. 유효측정 범위 설정

유효측정범위 설정은 정확한 두께의 측정을 위하여, 레이다가 시편의 두께에 의해 영향을 받는 모서리 간섭에 의한 영향을 알아보기 위한 것이다. 모서리 간섭에 따라 실험 결과 값이 많이 달라지므로 두께 측정을 실시하기 이전에 유효 측정 범위를 확보하는 것이 필요하다. 실험방법은 다음과 같다.



(a) Front view of specimen



(b) A-A' section

Fig. 5 Concrete specimen and measurement setup

- 1) 모서리에서 중심부까지 10° 씩 증가하도록 실험체에 표시한 후, 그 중간의 데이터를 10scan/mark로 맞추고 tangent곡선을 직선 보간하여 1° 단위로 값을 구해 모서리 반사의 영향을 살핀다.
- 2) 시편의 중앙부에서 모서리반사가 없으므로 오차비교시 기준으로 삼았다.
- 3)  $d = D \times \tan \theta$ 이다.

4.2. 두께 측정

시편의 두께는 앞면의 측정시간과 뒷면에서의 측정시간과의 차이, 즉 콘크리트 시편 내에서의 진행시간에 속도를 곱하여 구할 수 있다. 이때의 시간차는 왕복시간차이므로, 1/2을 곱한 값에 속력을 곱해야, 시편의 두께가 나오게 된다.

$$D = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \frac{\Delta T}{2} \tag{8}$$

여기서,  $D$  : thickness [mm]

$$c = 3 \times 10^8 \text{ [m/s]}$$

$\epsilon_r$  : dielectric constant

$\Delta T$  : two way travel time [ns]

4.3. 유전상수의 측정

측정된 데이터를 분석하기 위해서는 실험체의 유전상수 ( $\epsilon_r$ )를 알아야 시편 내에서 파의 진행 속도측정이 가능하고, 이를 통해 시간을 계산하여, 결론적으로 두께를 계산할 수 있다. 일반적으로 밝혀진 표면건조 상태의 콘크리트 유전상수는 8 ~ 9로 되어 있으며, 이는 수분함량과 배합비 등에 영향을 받으므로, 이에 대한 보정이 먼저 실시되어야 한다. 일반적으로 한 방향에서 접근이 가능한 곳에서 bistatic 안테나를 사용할 경우에는 코어채취를 해서 유전상수를 구하는 것이 가장 정확하다.

하지만 본 연구에서는 코어채취를 하지 않고 다른 방법을 통해 유전상수를 구하였다. 즉, 실제 시편의 두께를 알고, 유전상수를 모르고 있으므로, 두께를 이용해서 역으로 유전상수를 구했다.

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (9)$$

여기서,  $v = \frac{D}{\Delta T/2}$   
 $c = 3 \times 10^8$  [m/s]

100 ≤ D ≤ 200 일 때 :

$$L_e = L - 2D \tan(72 - 0.13D) \quad (12)$$

200 ≤ D ≤ 300 일 때 :

$$L_e = L - 2D \tan(62 - 0.08D) \quad (13)$$

5. 실험결과 및 분석

5.1. 유효측정 영역

모서리반사에 의한 영향을 살펴보면 일반적으로 모서리에서 멀어질수록 (각이 커질수록) 모서리에 의한 간섭이 적어서 실제와 가까워지는 것을 확인할 수 있다. Table 2는 실험 결과를 바탕으로 매질 내에서 파가 모서리반사에 의한 영향을 받지 않는 각도 및 모서리로부터의 거리를 나타낸다.

Table 2 Distance from the edge with no edge effect

Thickness D (mm)	Degree $\theta$ (°)	Distance from the edge d (mm)
50	66	109.7
100	59	166.4
150	53	195.4
200	46	207.1
250	42	225.1

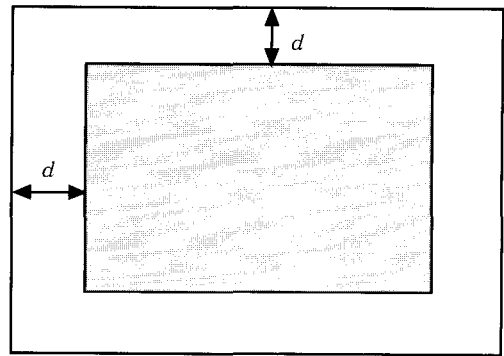
실험값을 통해 매질 내에서 파가 모서리반사에 의해 영향을 받지 않는 각도를 간략식으로 산출해보면 다음과 같다. 여기서, 두께 (D)의 단위는 mm이고,  $\theta$ 의 단위는 ° (degree)이다.

50 ≤ D ≤ 200 일 때 :  
 $\theta = 72 - 0.13D \quad (10)$

200 ≤ D ≤ 300 일 때 :  
 $\theta = 62 - 0.08D \quad (11)$

이에 의한 유효측정 범위 ( $L_e$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 두께 (D)와 길이 (L)의 단위는 mm이고,  $\theta$ 의 단위는 ° (degree)이다.

이 식을 바탕으로 모서리 간섭을 받지 않기 위한 이격 거리를 표시하면, Fig. 6과 같다.



$$d = D \times \tan(72 - 0.13D) \quad : (50 \leq D \leq 200)$$

$$d = D \times \tan(62 - 0.08D) \quad : (200 \leq D \leq 300)$$

Fig. 6 Optimum measurement area(shaded) with no edge effect

5.2. 두께측정

전자파는 매질이 변할 때 서로 다른 전자기적 특성으로 인하여 반사가 일어난다. 이 반사파를 수신해서 두께를 측정할 수 있다. 본 실험에서는 공기에서 모르타르로 변할 때의 파형을 확인하여 앞 표면을 찾아내고, 뒷면에 철판이 있는 경우와 그렇지 않은 경우의 파형을 비교하여 뒤 표면을 찾아내었다. 즉, 철판이 뒷면에 있는 경우는 전반사가 일어나게 되므로, 철판유무의 차이값 (concrete with steel plate - plain concrete)을 봤을 때, 가장 큰 값을 가지는 시점이 시편의 뒷면이라고 할 수 있다. 이는 전자기파의 전파 모델링을 통해서도 확인할 수 있다.

이를 이용하여 앞 표면과 뒤 표면의 시간차를 구하고, 그 값을 식 (9)에 대입하여 유전상수를 구한다. 계산에 의한 유전상수의 값을 식 (8)에 대입하여 두께를 계산한다.

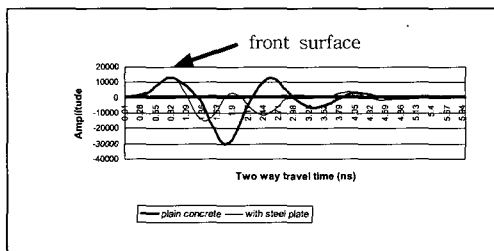
아래의 Fig. 7, 8은 각각 뒷면에 철판을 댄 경우와 그렇지 않은 경우의 파형의 변화와 그 두 값의 차이를 나타내고 있다. 두 그래프의 분석을 통하여 시편의 앞면과 뒷면에 도달하는 시간차이를 측정하며, 그 값을 식 (9)에 대입하여 유전상수를 구할 수 있다. 두께가 두꺼워 질수록 파의 감쇠로 인해, 뒷면을 찾아내기가 어려워짐을 알 수가 있다. 즉, 두께 200mm와 250mm인 경우에는 파의 감쇠로 인하여, 철판 유·무의 차이를 확인하는데, 상대적으로 어려움이 있다. 앞면과 뒷면의 결정은 매질간의 유전상수의 차이에 의한 반사 계수(reflective coefficient)값으로 결정할 수 있다. 즉, 공기에서 콘크리트로 투과시 반사계수 값과 콘크리트에서 공기로의 재투과시의 반사계수값을 이용하면 앞면과 뒷면을 찾을 수 있다. 이는 파형의 분석에서 확인이 되고, 전자기파의 모델링에 의해서도 규명된다. 두께가 두꺼워 지는 경우에는 파가 약해져서 판독이 어려운데, 이 경우, 철판의 전반사를 이용하여 효과적으로 측정할 수 있다.

5.3. 유전상수의 측정

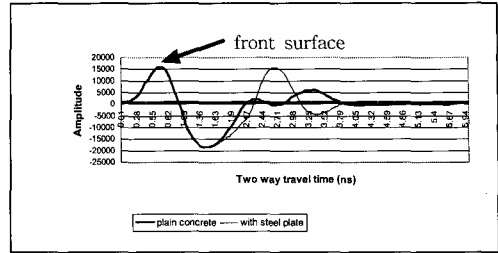
위의 실험 결과를 바탕으로 앞면과 뒷면의 시간차이를

Table 3 Calculation of Dielectric constant

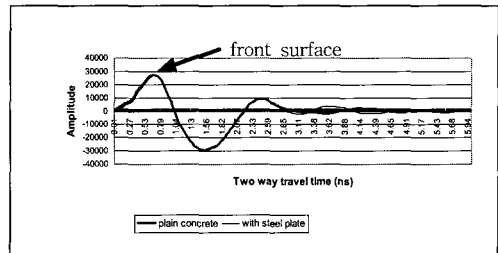
Thickness D (mm)	Elapsed Time (ns)		Travel time $\Delta T$ (ns)	Dielectric constant
	front surface	back surface		
50	0.82	1.83	1.01	9.18
100	0.68	2.66	1.98	8.82
150	0.64	3.60	2.96	8.76
200	0.69	4.64	3.95	8.78
250	0.69	5.64	4.95	8.82



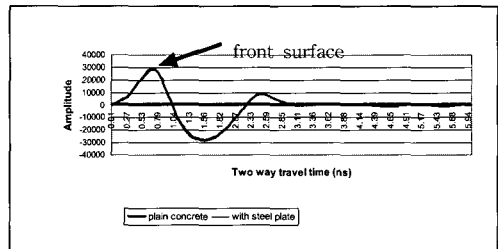
(a) 50mm Thick Specimen



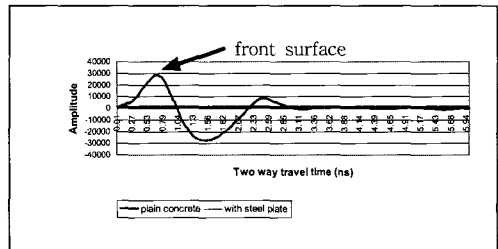
(b) 100mm Thick Specimen



(c) 150mm Thick Specimen

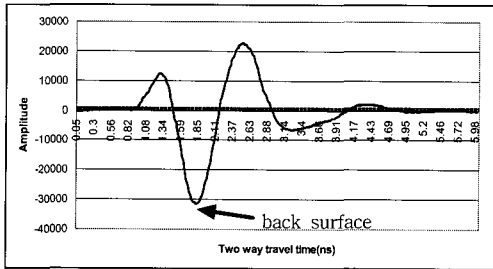


(d) 200mm Thick Specimen

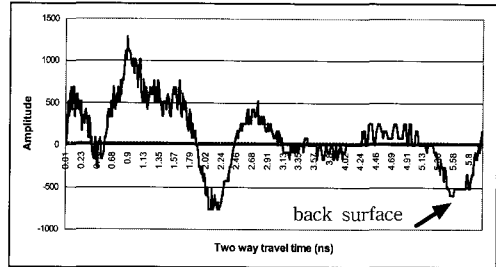


(e) 250mm Thick Specimen

Fig. 7 Measured data for plain concrete and concrete with steel plate on the back

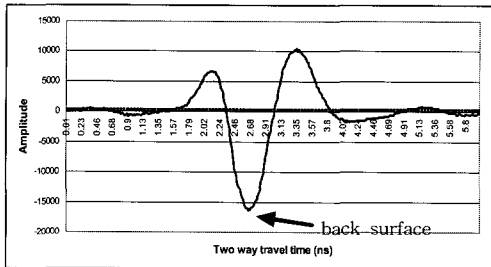


(a) 50 mm Thick Specimen

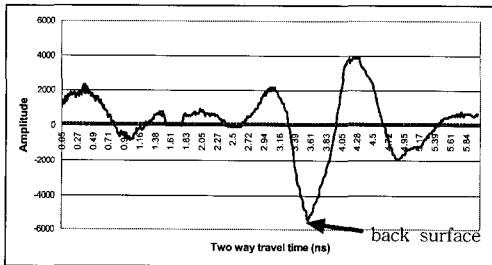


(e) 250 mm Thick Specimen

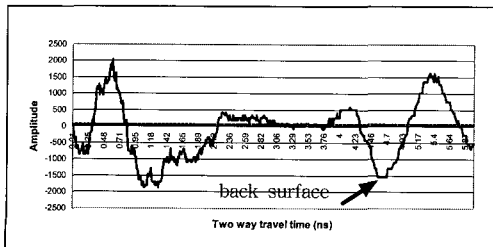
Fig. 8 Difference in signal between plain concrete specimen and specimen with steel plate on the back



(b) 100 mm Thick Specimen



(c) 150 mm Thick Specimen



(d) 200 mm Thick Specimen

Table 4 Calculation of thickness using average dielectric constant of 8.87

Thickness D (mm)	Calculated Thickness (mm)	Difference (%)
50	50.8	1.60
100	99.7	0.30
150	149.1	0.60
200	198.9	0.55
250	249.3	0.28

결정하고, 그 값으로부터 Table 3과 같이 유전상수를 구할 수 있다. 실험값을 보면 두께 50mm 시편을 제외하고는 앞면 측정 시간과 유전상수의 값이 거의 일치함을 보이고 있다. 유전상수의 값이 외부적인 요인, 건조정도, 보관상태에 의해 영향을 받음을 감안하면, 이는 시편의 차이로 비롯됨을 알 수 있다.

계산된 유전상수의 값을 평균하여, 식 (8)에 대입하면 Table 6에서와 같이 각각의 시편 두께를 계산할 수 있다.

## 6. 결 론

1) 두께가 큰 실험체 일수록 감쇠에 의해 모서리반사의 영향각도가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 시편의 두께가 두꺼워 질수록, 정확한 결과를 얻기 위한 모서리로부터의 이격 거리는 늘어난다.



2) 두께가 얇은 시편은 앞면과 뒷면을 쉽게 확인 할 수 있었지만, 두께가 두꺼워 질수록, 파의 감쇠로 인하여 결과가 판독하기 어려워진다. 이는 감쇠 계수 및 레이더의 중심 주파수 등과 관련이 있다. 즉, 시편의 두께가 200mm 인 경우에는 감쇠상수로 인한 투과 깊이의 제한으로 뒷면의 확인이 어려워진다. 이 경우, 중심주파수를 낮춤으로 해서 투과 깊이를 증가 시킬 수 있으나, 상대적으로 파의 강도가 약해지는 단점이 있다.

3) 철판이 전자기파에 대해서 전반사를 일으킨다는 것을 이용하여, 콘크리트 시편의 두께가 두꺼워질수록 증가하는 파의 감쇠문제를 효과적으로 해결할 수 있었다.

4) 정확한 유전상수를 알고 있을 때, 레이더법을 이용한 콘크리트의 비파괴 검사의 기본이 되는 콘크리트의 두께는 거의 정확하게 찾아낼 수 있다.

## 7. 감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)에서 설립한 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)로부터 연구비를 지원받았고, 교육부의 1996년도 이공계대학연구소 기자재 첨단화 지원사업에 따라 연세대학교 공과대학 비파괴구조 연구실이 보유하고 있는 첨단기자재를 사용하였다.

## 참고문헌

- [1] Chong, K. P., Scalzi, J. B., and Dillon, O. W., Overview of Nondestructive Evaluation Projects and Initiative at NSF," Journal of Intelligent Materials, System and Structures, Vol. 1, pp. 422~431, (1990)
- [2] Udaya, B. H., Chen, H. L. R., Bhandarkar, V., and Sami, Z., "Detection of Sub-Surface Anomalies in Concrete Bridge Decks Using Ground Penetrating Radar," ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 5, pp. 396~408, (1997)
- [3] Daniels, D. J., "Surface Penetrating Radar," The Institution of Electrical Engineers, 300 p., (1996)
- [4] Gerardo G. C., "Short-pulse radar method," CRC Handbook on Non-destructive Testing of Concrete, CRC Press, Boston, 343 p., (1991)
- [5] Rhim, H. C. and Buyukozturk, O., "Electromagnetic Properties of Concrete at Microwave Frequency Range," ACI Materials Journal, Vol. 95, No. 3, pp. 262~271, (1998)
- [6] 임홍철, 조윤범, "유한차분 시간영역법을 이용한 콘크리트의 두께측정과 철근위치 탐사를 위한 전자기파 전파 모델링," 한국전산구조공학회, 제12권, 제4호, pp. 639~648, (1999)
- [7] Rhim, H. C., Buyukozturk, O., and Blejer, D. J., "Remote Radar Imaging of Concrete Slabs with and without a Rebar," Materials Evaluation, American Society for Nondestructive Testing, Vol. 52, No. 2, pp. 295~299, (1995)
- [8] Rhim H. C. and Park, K. H., "Imaging of Steel Bars Embedded inside Mortar Specimens for Nondestructive Testing," KCI Concrete Journal, Vol. 12, No. 1, pp. 139~104, (2000)
- [9] Johnson. R. C., Antenna Engineering Handbook, McGrawHill, New York, 1477 p., (1993)